بررسی عددی چیلرهای جذب سطحی سیلیکاژل- آب با بستر دارای فین‌های صفحه‌ای*

مهدی مهدوی خواه[۱] مجتبی مأموریان [۲] حمید نیازمند [۳]

چکیده *یکی از روش‌های تبرید که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته، سیکل جذب سطحی است که بر اساس جذب و احیای یک ماده‌ی جذب‌شونده در مواد جاذب که ذرات جامد متخلخل هستند کار می‌کند. عملکرد چیلر به پارامترهای زیادی وابسته است و یکی از پارامترای تأثیرگذار در انتقال حرارت و جرم در بستر ماده‌ی جاذب، ارتفاع فین‌ها می‌باشد. در این مقاله مقدار بهینه‌ی ابعاد فین در بستر ماده‌ی جاذب چیلر جذب سطحی که از ذرات سیلیکاژل نوع RD پر شده‌اند و سیال عامل آب به‌عنوان جاذب می‌باشد به‌وسیله مدل‌سازی عددی محاسبه شده است. مدل‌سازی شامل انتقال حرارت در سیال ناقل حرارت، لوله‌ی فلزی و فین‌ها و انتقال حرارت و جرم در بستر مواد جاذب می‌باشد که باید به‌صورت هم‌زمان حل شوند. از روش حجم کنترل برای حل سه‌بعدی معادلات استفاده شده است. پس از بررسی نتایج مشاهده شد که با افزایش ارتفاع فین بستر، مقدار ضریب عملکرد افزایش و مقدار ظرفیت سرمایش مخصوص کاهش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی چیلر جذب سطحی، سیلیکاژل، ارتفاع فین، مدل‌سازی عددی.

Numerical Investigation of Silica Gel-Water Adsorption Chillers with Plate Fins Bed

M. Mahdavikhah M. Mamourian H. Niazmand

Abstract *One of the cooling systems that has received considerable attentions in recent years is the adsorption chiller, which works based on the adsorption and desorption of a working fluid in a solid porous bed. Different parameters such as fin height directly affect the bed heat and mass transfer processes, and therefore, the performance of the adsorption chillers. In the present study a numerical model has been introduced to optimize the fin height in a RD silica gel bed with water as the working fluid. A control volume approach has been employed to determine the temperature distributions in the heat transfer fluid, metal tube, and fins, while the simultaneous solutions of the heat and mass transfer equations should be carried out in a three dimensional coordinate system for the adsorption bed. It was found that the coefficient of performance increases and specific cooling power decreases as the fin height of the bed increases.*

Key Words adsorption chiller, silica gel, fin height, numerical modeling.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۱۰/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۱/۲۱ می‌باشد.

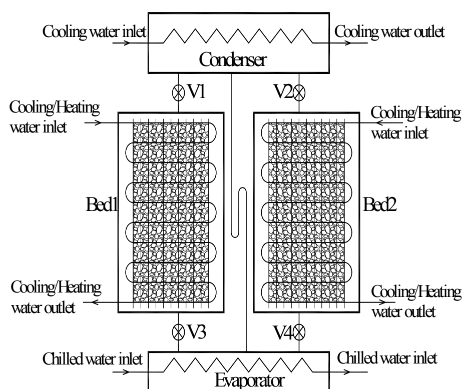
(۱) کارشناس ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۳) استاد، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

در میان روش‌های بسیاری که برای ایجاد برودت وجود دارد، دو روش تراکم بخار و جذبی کاربرد بیش‌تری در صنعت تبرید و تهویه‌ی مطبوع دارند. سیکل جذبی دارای مزایای زیادی نسبت به سیکل تراکمی می‌باشد و بسیار مورد توجه قرار گرفته است. چیلرهای جذبی را می‌توان به دو دسته‌ی کلی جذب حجمی (Absorption) و جذب سطحی (Adsorption) تقسیم‌بندی کرد. چیلرهای جذب حجمی علی‌رغم برتری‌های فراوانی که نسبت به چیلرهای تراکمی دارند، خود دارای معایبی هستند و در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به سیکل‌هایی که بر اساس جذب سطحی کار می‌کنند شده است.

سیکل چیلر جذب سطحی مانند چیلر تراکمی از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است. کندانسور، شیر اختناق و اواپراتور در هر دو مشترک هستند و در چیلر جذب سطحی، محفظه‌های جاذب نقش کمپرسور را ایفا می‌کنند و به‌عبارتی کمپرسور حرارتی جایگزین کمپرسور مکانیکی شده است. بستر جاذب از مواد جامدی پر شده است که می‌توانند سیالات خاصی را جذب و مجدداً احیا کنند. این جامدات متخلخل هنگامی که سرد شوند بخار سیال را از فشار پایین (فشار اواپراتور) جذب می‌کنند و با گرم شدن بخار را در فشار بالاتر (فشار کندانسور) احیا می‌سازند. این فرآیند به‌صورت تکرارپذیر انجام می‌شود.

در شکل (۱) طرح کلی از یک چیلر جذب سطحی نشان داده شده است. در ابتدا شیرهای V1، V2، V3 و V4 بسته‌اند. آب گرم وارد لوله‌های بستر ۱ می‌شود و فرآیند احیا آغاز می‌گردد. در اثر احیای سیال عامل فشار بستر ۱ در جرم ثابت تا فشار کندانسور افزایش می‌یابد. در همین زمان آب سرد وارد لوله‌های فین‌دار مبدل بستر ۲ می‌شود و در اثر کاهش دمای ذرات جاذب، فرآیند جذب سیال عامل شروع می‌گردد و فشار بستر ۲ در جرم ثابت تا فشار اواپراتور کاهش خواهد یافت. در مرحله‌ی دوم شیر V1 باز می‌گردد و سیال عامل احیا شده در بستر۱ وارد کندانسور می‌شود. سیال عامل پس از گذشتن از کندانسور وارد شیر اختناق می شود و با افت فشار، دمایش کاهش می‌یابد. در این مرحله شیر V4 باز است و سیال پس از دریافت گرما از منبع دما پایین جذب مواد جاذب در بستر ۲ خواهد شد. در این مرحله گرما دادن به بستر۱ و خنک کردن بستر ۲ ادامه دارد تا هر دو بستر به حالت اشباع برسند. در مرحله‌ی سوم شیرهای V1، V2، V3 و V4 بسته‌اند و عکس مرحله‌ی ۱ انجام می‌شود یعنی بستر ۱ خنک می‌شود تا فشار آن به فشار اواپراتور برسد و بستر ۲ گرم می‌شود تا به فشار کندانسور برسد. در مرحله‌ی چهارم عکس مرحله دوم انجام می‌شود؛ بستر ۱ به اواپراتور و بستر ۲ به کندانسور متصل خواهد شد. پس از پایان مرحله‌ی چهارم، سیکل کامل می‌شود.



شکل ۱ طرح کلی از اجزای چیلر جذب سطحی

برخی از مزایای سیکل جذب سطحی عبارتند از [1]:

– استفاده از منابع انرژی دما پایین (حدود ۵۰°C) مانند انرژی خورشیدی و منابع دما بالا (تا حدود ۴۰۰ °C).

– عدم نیاز به قطعات متحرک برای به حرکت در آوردن سیال عامل.

- عمر بسیار طولانی، عدم تولید صدا و لرزش، هزینه‌ی تعمیر و نگهداری بسیار پایین و قابلیت اطمینان بالا.
- نداشتن برخی مشکلات چیلرهای جذب حجمی مانند کریستاله شدن و خوردگی.

مهم‌ترین قسمت چیلرهای جذب سطحی، بستر ماده‌ی جاذب است و طراحی این قسمت تأثیر زیادی در عملکرد چیلر خواهد داشت. مراجع [4-2] در مطالعات تجربی خود از لوله‌های با فین‌های حلقوی به‌عنوان بستر ماده‌ی جاذب استفاده کرده‌اند. برای تحلیل عددی این نوع مبدل‌ها نیاز به مختصات استوانه‌ای می‌باشد. لیونگ و همکارش [5] روش‌های مدل‌سازی ارائه شده را به دو بخش مدل انتقال حرارت (فرض فشار یکنواخت بستر) و مدل انتقال جرم و حرارت (فرض فشار غیریکنواخت بستر) تقسیم‌بندی کرده است. در این مقاله براساس تحلیل مرتبه‌ی بزرگی، دو معیار کلی برای بررسی صحت فرض فشار یکنواخت ارائه شده است و برای هر کدام یک عدد بدون بعد به‌دست آورده‌اند و با کمک این اعداد می‌توان بررسی کرد که آیا فرض فشار یکنواخت دارای اعتبار است یا خیر. یکی از این معیارها که بر اساس نسبت انتقال حرارت هدایت به جابه‌جایی است، معمولاً برای شرایط مختلف ارضا می‌شود و شرط دوم که بر اساس مقاومت انتقال جرم کوچک است، باید برای شرایط مختلف بررسی گردد. در صورتی که عدد بدون بعد معرفی‌شده در مرجع [5] تقریباً معادل یک باشد می‌توان از فرض فشار یکنواخت با تقریب مناسب استفاده کرد. در این حالت، انتقال جرم در بستر ناچیز و توزیع فشار یکنواخت فرض می‌شود در نتیجه معادله‌ی مومنتوم حل نمی‌شود و از جمله‌ی جابه‌جایی در معادله‌ی انتقال حرارت نیز صرف نظر می‌گردد. این تقریب برای ارتفاع فین ناچیز یا قطر ذرات جاذب بزرگ که اختلاف فشار در بستر ناچیز باشد قابل قبول است. داگلاس و همکارانش [6] با استفاده از فرض فشار یکنواخت تأثیر دمای آب گرم و آب خنک کننده را بر عملکرد چیلر به‌دست آورده و نشان داده‌اند که نتایج ارائه‌شده با ۲۰٪ خطا بر مقادیر تجربی منطبق است. چوا و همکارانش [7] از یک مدل انتقال حرارت (فرض فشار یکنواخت) برای مدل‌سازی بستر ماده‌ی جاذب در مختصات استوانه‌های بر روی لوله‌های فین‌دار استفاده کرده‌اند که نتایج به‌دست آمده از حل عددی برای دمای سیال خروجی از بستر تطابق خوبی بر نتایج تجربی دارد.

چنانچه معیار ارائه شده در مرجع [5] برآورده نگردد بایستی معادلات انتقال جرم همراه با معادله‌ی انتقال حرارت حل شوند. آنالیز فرآیند انتقال در یک ناحیه‌ی متخلخل که بر اساس انتقال جرم و حرارت باشد پیچیده‌تر است و باید معادلات مومنتوم، پیوستگی و انتقال حرارت توأماً حل شوند. لیونگ و لیو [8] معادلات انتقال حرارت و جرم را برای ذرات جاذب زئولیت اطراف یک لوله بدون فین حل کرده‌اند و مشاهده کردند با افزایش ارتفاع بستر مقدار ضریب عملکرد مخصوص کاهش و مقدار ضریب عملکرد افزایش می‌یابد. مگیو و همکارانش [9] مسأله‌ی مشابه مرجع [8] را حل کردند و تأثیر بازیابی حرارت را بر عملکرد چیلر با دو بستر جاذب بررسی کرده‌اند. نیازمند و داب‌زاده [10] با در نظر گرفتن توزیع فشار در بستر، چیلر جذب سطحی با فین‌های حلقوی را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه تأثیر ارتفاع فین و فاصله‌ی بین فین‌ها بررسی شده است.

با توجه به ضریب انتقال حرارت هدایت پایین ذرات جاذب، استفاده از فین عملکرد بستر جاذب را به میزان زیادی بهبود می‌بخشد. زانگ [11] یک مدل سه‌بعدی انتقال جرم و حرارت را برای ذرات جاذب اطراف یک لوله‌ی فلزی با فین‌های طولی در مختصات استوانه‌ای را ارائه کرده است. به‌علاوه مقادیر دما در دو نقطه از بستر نسبت به زمان به روش تجربی اندازه‌گیری و با مقادیر عددی مقایسه گردیده است و

تطابق خوب داده‌ها نشان دهنده‌ی دقت مدل انتقال حرارت و جرم می‌باشد.

عملکرد بستر جاذب با فین‌های پیوسته در تعداد محدودی از مطالعات تجربی بررسی شده است. چانگ و همکارانش [12] عملکرد چیلر سیلیکاژل-آب که بستر آن از مبدل با فین‌های صفحه‌ای پیوسته ساخته شده است را به‌منظور استفاده از انرژی خورشید در ماه‌های مختلف سال به‌صورت تجربی بررسی کرده‌اند. یانگ و همکارانش [13] در مطالعه‌ی تجربی خود از چیلرهایی با مبدل حرارتی لوله- صفحه استفاده کرده‌اند. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که اثر سطوح انتقال حرارت بر عملکرد بستر با فین‌های صفحه‌ای تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. این نوع مبدل‌های حرارتی به‌دلیل سادگی در ساخت و عملکرد مناسب کاربرد زیادی در بستر ماده‌ی جاذب چیلرهای جذب سطحی دارند و برای تحلیل عددی این نوع مبدل‌ها نیاز به حل سه بعدی معادلات حاکم در دستگاه مختصات عمومی می‌باشد. در این مطالعه برای بهبود فرآیند انتقال جرم و حرارت از فین‌های عرضی پیوسته استفاده شده است و اثر ابعاد فین بر عملکرد بستر با استفاده از حل هم‌زمان معادلات مومنتوم، پیوستگی و انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌سازی و معادلات حاکم

مبدل حرارتی که در این مقاله مورد بررسی گرفته و در کاربردهای عملی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد مبدل حرارتی با فین‌های صفحه‌ای است. این مبدل از چندین لوله که به‌صورت موازی کنار هم قرار گرفته‌اند تشکیل شده که فین‌ها به‌صورت عمود بر محور لوله روی آن‌ها نصب شده‌اند. به‌منظور کاهش حجم محاسبات و به دلیل تقارن، تنها ناحیه اطراف یکی از لوله‌ها به‌عنوان حوزه‌ی حل در نظر گرفته شده است. البته این تقارن برای دو لوله‌ی ابتدا و انتها صادق نیست که با توجه به تعداد زیاد لوله‌ها فرض انجام شده معقول می‌باشد.

مدل‌سازی محفظه‌ی جاذب شامل چهار بخش اصلی یعنی سیال ناقل حرارت، لوله‌ی فلزی، فین‌ها و بستر ماده‌ی جاذب می‌باشد.

فرضیات زیر در معادلات به‌کار رفته است:

- بستر ماده‌ی جاذب از ذراتی با اندازه‌ی یکنواخت پر شده است که دارای خواص یکسانی در جهات مختلف هستند.
- اتلاف حرارت در سیکل جذب وجود ندارد.
- مقاومت حرارتی بین لوله‌ی فلزی و فین‌ها ناچیز فرض شده است.
- خواص لوله‌ی فلزی و فین‌ها ثابت فرض شده است.
- کندانسور و اواپراتور ایده آل فرض شده‌اند.
- سیال عامل در فاز جذب شده به‌صورت مایع و در فاز احیا شده به‌صورت بخار دارای رفتار گاز ایده‌آل فرض شده است.

سیال ناقل حرارت. شامل مدل‌سازی سیالی است که داخل لوله جریان دارد. در مراحل اول و دوم که احیا در بستر صورت می‌گیرد سیال گرم در لوله‌ها جریان دارد و در مراحل سوم و چهارم که عمل جذب در بستر انجام می‌شود سیال سرد داخل لوله‌ها جاری است.

$$\int_{cv}\rho_f C_{pf}\frac{\partial T_f}{\partial t}d\forall+\int_{cs}\left(\rho_f C_{pf}\vec{u}_f T_f\right).\overrightarrow{dA}=-Q_{f-tube} \qquad (1)$$

در کاربردهای صنعتی، عدد رینولدز سیال حرارتی داخل لوله بالاست؛ به‌عنوان مثال در این مطالعه عدد رینولدز حدود ۱۲۰۰۰ و عدد پرنتل حدود ۶/۵ است. جریان سیال داخل لوله کاملاً توسعه یافته و متلاطم با توزیع دمای یکسان در جهت شعاعی در نظر گرفته شده است. این معادله در واقع تغییرات دمای میانگین سیال را در حین جریان در داخل لوله محاسبه می‌کند.

البته باید در نظر داشت که می‌توان معادلات کامل انتقال مومنتوم و حرارت را به‌صورت دو بعدی تقارن محوری یا سه‌بعدی حل نمود ولی از آنجا که مسأله‌ی مورد نظر در مقاله‌ی حاضر بیش‌تر مطالعه‌ی انتقال حرارت و جرم داخل بستر است از یک مدل یک‌بعدی ساده‌شده و روابط تجربی برای محاسبه‌ی انتقال حرارت در سیال ناقل حرارت استفاده شده است. مقدار حرارت منتقل شده از سیال به جدار داخلی لوله‌ی فلزی به شکل زیر محاسبه شده است.

$$Q_{f-tube} = h_f A (T_f - T_{interface}) \quad (۲)$$

که در آن T_f دمای میانگین سیال در هر شبکه و $T_{interface}$ دمای دیوار داخلی لوله‌ی فلزی است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سیال و جدار داخلی لوله‌ی فلزی (h_f) از رابطه‌ی زیر محاسبه شده است [11].

$$Nu = 0.023\, Re^{0.8}\, Pr^{n} \quad \begin{matrix} n=0.3 & \text{for cooling} \\ n=0.4 & \text{for heating} \end{matrix} \quad (۳)$$

شرایط مرزی به‌صورت زیر است:

$$T_f = T_{in-cooling} \quad \text{at } z = 0 \quad \text{برای سرمایش} \quad (٤)$$

$$T_f = T_{in-heating} \quad \text{at } z = 0 \quad \text{برای گرمایش} \quad (۵)$$

لوله‌ی فلزی. برای جداره‌ی لوله‌ی فلزی معادله‌ی انتقال حرارت هدایت به‌صورت سه‌بعدی گذرا در مختصات استوانه‌ای حل شده است.

$$\int_{cv} (\rho C_p)_{tube} \frac{\partial T_{tube}}{\partial t} d\forall = \int_{cs} \left(\lambda_{tube} \vec{\nabla} T_{tube} \right) . \overrightarrow{dA} + S \quad (٦)$$

که در آن

$$S = -\gamma * Q_{tube-fin} \quad (۷)$$

باید توجه داشت که در حل عددی ضخامت فین نسبت به ابعاد حجم کنترل‌های موجود در لوله‌ی فلزی و فاصله‌ی بین فین‌ها کوچک‌تر است؛ در نتیجه تعداد زیادی از حجم کنترل‌ها بدون فین خواهند بود. بنابراین گرمای خارج شده از لوله‌ی فلزی به فین به‌صورت یک جمله چشمه در حجم کنترل‌هایی که شامل فین هستند لحاظ شده است. برای رعایت این نکته اگر حجم کنترل شامل فین باشد، $\gamma = 1$ است و گرما از حجم کنترل خارج می‌شود. در غیر این صورت، $\gamma = 0$ است و هیچ گرمایی از حجم کنترل خارج نمی‌شود. گرمای منتقل شده از لوله‌ی فلزی به فین توسط رابطه‌ی زیر محاسبه شده است.

$$Q_{tube-fin} = \lambda_{tube-fin} * A * \frac{(T_{2,tube} - T_{1,fin})}{\delta} \quad (۸)$$

در این رابطه $\lambda_{tube-fin}$ ضریب انتقال حرارت معادل بین لوله‌ی فلزی و فین و δ فاصله‌ی بین مرکز دو حجم کنترل در مرز مشترک بین فین و لوله‌ی فلزی است. شرایط مرزی زیر برای معادله در نظر گرفته شده است:

$$\lambda_{tube} A \left. \frac{\partial T_{tube}}{\partial r} \right|_{r=r_i} = -Q_{f-tube} \quad (۹)$$

$$\lambda_{tube} A \left. \frac{\partial T_{tube}}{\partial r} \right|_{r=r_o} = Q_{tube-b} \quad (۱۰)$$

$$\left. \frac{\partial T_{tube}}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = \left. \frac{\partial T_{tube}}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_{max}} = \left. \frac{\partial T_{tube}}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T_{tube}}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \quad (۱۱)$$

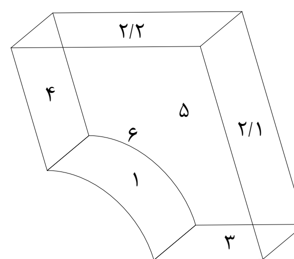
فین‌ها. ضخامت فین‌ها نسبت به سایر ابعاد بسیار کم است و می‌توان انتقال حرارت در آن‌ها را به‌صورت دوبعدی در جهت x و y فرض کرد.

$$\int_{cv}\rho_{fin}C_{pfin}\frac{\partial T_{fin}}{\partial t}d\forall=\int_{cs}\left(\lambda_{fin}\vec{\nabla}T_{fin}\right).d\vec{A}+S \qquad (۱۲)$$

مقدار حرارت منتقل شده از فین به بستر به‌صورت عبارت چشمه در حجم کنترل‌های فین لحاظ شده است.

$$S=-Q_{fin-b} \qquad (۱۳)$$

معادله‌ی هدایت به‌صورت دوبعدی در دستگاه مختصات عمومی حل می‌شود. شرایط مرزی در وجوه مختلف حوزه‌ی حل که در شکل (۲) نشان داده شده است به‌صورت زیر قابل بیان می‌باشد. وجه ۱ اشاره به وجه بین فین و لوله‌ی فلزی دارد.



شکل ۲ نام‌گذاری وجوه حوزه‌ی عددی برای اعمال شرایط مرزی

$$\lambda_{fin}A\frac{\partial T_{fin}}{\partial n}\bigg|_{face1}=Q_{tube-fin} \qquad (۱۴)$$

$$\frac{\partial T_{fin}}{\partial n}\bigg|_{face2}=\frac{\partial T_{fin}}{\partial n}\bigg|_{face3}=\frac{\partial T_{fin}}{\partial n}\bigg|_{face4}=0 \qquad (۱۵)$$

بستر ماده‌ی جاذب. مهم‌ترین قسمت در مدل‌سازی محفظه‌ی جاذب، بستر ماده‌ی جاذب می‌باشد که شامل مواد متخلخل و حرکت بخار در این محیط متخلخل است. در این مقاله از یک مدل انتقال جرم و حرارت استفاده شده است که شامل چهار معادله‌ی اصلی موازنه‌ی انرژی، بقای جرم، مومنتوم و معادله‌ی حالت است.

موازنه‌ی انرژی برای بستر جاذب به‌صورت زیر است:

$$\int_{cv}\rho C_p\frac{\partial T_b}{\partial t}d\forall+\int_{cs}\left(\rho_g\,C_{pg}\vec{u}_g\,T_b\right).\overrightarrow{dA} =\int_{cs}\left(\lambda_b\vec{\nabla}T_b\right).\overrightarrow{dA}+\int_{cv}\rho_b\Delta H\,\frac{\partial w}{\partial t}d\forall \qquad (۱۶)$$

که در آن

$$\rho C_p=\varepsilon_t(\rho_g C_{pg})+\rho_b(C_{pb}+wC_{pa}) \qquad (۱۷)$$

تخلخل کل بستر توسط رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\varepsilon_t=\varepsilon_b+(1-\varepsilon_b)\varepsilon_p \qquad (۱۸)$$

برای محاسبه‌ی توزیع دما در ناحیه‌ی متخلخل، باید معادله‌ی انرژی همراه با جمله‌ی جذب که آخرین جمله در معادله‌ی (۱۶) می‌باشد به‌صورت سه‌بعدی در دستگاه مختصات عمومی حل شود. این جمله در واقع نشان‌دهنده‌ی میزان انرژی جذب شده در فرآیند احیای سیال عامل و یا انرژی آزاد شده در فرآیند جذب بخار سیال عامل می‌باشد که نحوه‌ی محاسبه آن بیان خواهد شد.

موازنه‌ی جرم برای فاز بخار سیال عامل به‌صورت زیر است:

$$\int_{cv}\varepsilon_t\frac{\partial\rho_g}{\partial t}d\forall+\int_{cs}\left(\rho_g\,\vec{u}_g\right).d\vec{A}+\int_{cv}\rho_b\frac{\partial w}{\partial t}d\forall=0 \qquad (۱۹)$$

در اینجا w مقدار جذب در هر لحظه می‌باشد که توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [7].

$$\frac{dw}{dt}=15D_{so}\exp\left(-\frac{E_a}{RT_b}\right)/[R_p^2.\left(w^*-w\right)] \qquad (۲۰)$$

که در آن w^* جذب تعادلی در دمای T_b و فشار P است. مرجع [14] با استفاده از یک مطالعه‌ی تجربی رابطه‌ی زیر را برای سیلیکاژل نوع RD ارائه کرده

است.

$$w^* = 5.5 * 10^{-12} P \exp\left(\frac{2.37}{RT_b}\right) \quad (۲۱)$$

بستر ماده‌ی جاذب به‌صورت یک محیط متخلخل می‌باشد؛ در نتیجه سرعت سیال عامل در بستر توسط رابطه‌ی دارسی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [8]:

$$\vec{u}_g = -\frac{K_{app}}{\mu}\vec{\nabla}P \quad (۲۲)$$

این رابطه تنها برای جریان‌های ویسکوز با سرعت پایین مناسب است و برای اعداد رینولدز بستر کوچک‌تر از یک دارای اعتبار است. در حوزه‌ی مورد مطالعه، مقدار عدد رینولدز کوچک‌تر از یک می‌باشد و بنابراین رابطه‌ی دارسی برای مدل‌سازی انتخاب شده است. روابط دقیق‌تر مانند دارسی برینکمن و دارسی توسعه‌یافته تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دقت نتایج ندارند و پیچیدگی زیادی در حل معادلات وارد می‌کنند. بنا به دلایل فوق و اعتباری که رابطه‌ی دارسی داراست، در این مطالعه از رابطه‌ی دارسی استفاده شده است.

برای محاسبه‌ی توزیع فشار با ترکیب دو معادله‌ی موازنه جرم و مومنتوم رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\int_{cv}\varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} d\forall = \int_{cs}\left(\rho_g \frac{K_{app}}{\mu}\vec{\nabla}P\right).d\vec{A} - \int_{cv}\rho_b \frac{\partial w}{\partial t} d\forall \quad (۲۳)$$

در این مطالعه فرض شده است بستر از ذراتی با اندازه‌ی یکنواخت پر شده است که دارای خواص یکسانی در جهات مختلف هستند. در نمونه‌های تجربی از یک بازه برای قطر ذرات استفاده می‌شود بنابراین در واقعیت محیطی کاملاً ایزوتروپ وجود ندارد اما این فرض در تمامی مطالعاتی که روی بستر ماده‌ی جاذب چیلرهای جذب سطحی انجام شده است در نظر گرفته می‌شود. مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج تجربی نشان داده است این فرض برای شرایط بستر چیلر مورد قبول می‌باشد. نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [15,16]:

$$K_{app} = K_d + \frac{\varepsilon_p \mu}{\tau p} D_{ek} \quad (۲٤)$$

$$K_d = \frac{\varepsilon_b^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon_b)^2} \quad (۲۵)$$

$$D_{ek} = \left(\frac{1}{D_m} + \frac{1}{D_k}\right)^{-1} \quad (۲٦)$$

$$D_m = 0.02628\frac{\sqrt{T^3/M}}{P\sigma^2\Omega} \quad (۲۷)$$

$$D_k = 48.5 d_P \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (۲۸)$$

هم‌چنین از رابطه‌ی گاز کامل برای محاسبه‌ی مقدار چگالی بخار سیال عامل در فاز احیا شده استفاده شده است.

$$P = \frac{\rho_g RT}{M} \quad (۲۹)$$

شرایط مرزی معادله‌ی پیوستگی و انرژی به‌صورت زیر است:

$$\lambda_b A \frac{\partial T_b}{\partial n}\bigg|_{face1} = Q_{tube-b} \quad (۳۰)$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial n}\bigg|_{face2} = \frac{\partial T_b}{\partial n}\bigg|_{face3} = \frac{\partial T_b}{\partial n}\bigg|_{face4} = 0 \quad (۳۱)$$

$$\lambda_b A \frac{\partial T_b}{\partial n}\bigg|_{face5} = Q_{fin-b} \quad (۳۲)$$

$$\lambda_b A \frac{\partial T_b}{\partial n}\bigg|_{face6} = Q_{fin-b} \quad (۳۳)$$

گرادیان فشار کلیه‌ی وجوه به‌جز وجه ۲/۱ که با محفظه فصل مشترک دارد صفر فرض شده است. فشار

در وجه ۲/۱ با فشار محفظه برابر در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن در وجه ۲/۲ گرادیان فشار عمود بر این سطح برابر صفر فرض شده است.

$$P|_{face\ 2/1} = P_{chamber} \quad (۳٤)$$

فشار محفظه در مرحله‌ی گرمایش فشار ثابت برابر با فشار کندانسور و در مرحله‌ی سرمایش فشار ثابت برابر با فشار اواپراتور می‌باشد. فشار محفظه که در اثر حضور بخار سیال عامل در آن ایجاد می‌شود در مراحل جرم ثابت به این ترتیب محاسبه می‌شود که ابتدا با انتگرال‌گیری دبی جرمی سیال عامل خروجی از مرز مشترک بین محفظه و بستر جاذب مقدار کل جرم وارد شده به محفظه محاسبه می‌شود.

$$\dot{m} = \int_{face\ 1/2} \rho_g u_g dA \quad (۳۵)$$

سپس با فرض یکنواخت بودن چگالی سیال عامل در محفظه مقدار آن با استفاده از اصل بقا جرم به‌صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$\dot{m} = \forall_{chamber} \frac{\partial \rho_{chamber}}{\partial t} \quad (۳٦)$$

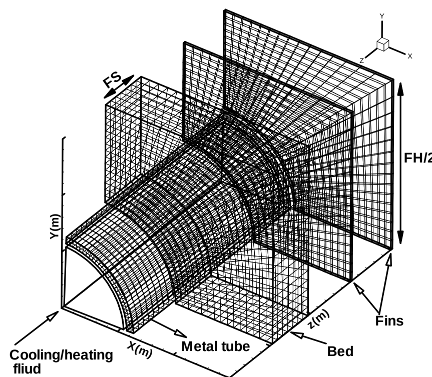
در نهایت با استفاده از رابطه‌ی گاز کامل، فشار محفظه به‌دست می‌آید.

$$P_{chamber} = \rho_{chamber} R T_{chamber} \quad (۳۷)$$

در این‌جا مقدار دمای محفظه برابر با دمای میانگین مرز مشترک بین محفظه و بستر جاذب فرض شده است.

روش عددی و اعتبار سنجی

معادلات مربوط به چهار حوزه‌ی حل که در بخش قبل معرفی شد با استفاده از روش حجم کنترل حل می‌شوند. شبکه‌بندی برای بستر و فین‌ها در دستگاه مختصات عمومی و برای لوله‌ی فلزی و سیال ناقل حرارت در دستگاه مختصات استوان‌های می‌باشد. برای شبکه‌بندی، یک حوزه‌ی فیزیکی و یک حوزه‌ی محاسباتی تعریف شده است. حوزه‌ی فیزیکی همان حوزهای است که بر فیزیک مسأله منطبق است و هدف نهایی محاسبه مقادیر در این حوزه می‌باشد. حوزه‌ی محاسباتی یک حوزه‌ی مستطیلی است که معادلات حاکم در این حوزه حل و با یک تبدیل به حوزه فیزیکی تبدیل می‌شوند. تعداد شبکه به گون‌های انتخاب شده است که نسبت ابعاد شبکه زیاد نباشد. چهار حوزه‌ی حل که باید به‌صورت هم‌زمان حل شوند در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ شبکه‌بندی ٤ حوزه‌ی حل برای مدل‌سازی

معادلات حاکم بر بستر ماده‌ی جاذب مستقل از هم نیستند. هم‌چنین معادلات مربوط به حوزه‌های مختلف با هم مرتبط هستند. بنابراین باید از الگوریتمی استفاده شود که بتواند با شروع از مقدار اولیه، مراحل مختلف سیکل را مدل‌سازی کند. در ادامه الگوریتم استفاده شده برای حل معادلات شرح داده شده است.

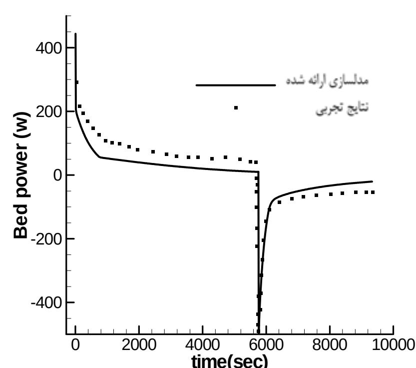
پس از اعمال شرایط اولیه، شمارهی مرحله و شمارهی سیکل مقدار یک در نظر گرفته میشود و الگوریتم حل آغاز میگردد. پس از اینکه مرحلهی سیکل در گام زمانی معین شد، بهترتیب معادلات انرژی برای سیال ناقل حرارت، لولهی فلزی و فین شمارهی یک حل میشود. سپس به ترتیب معادلهی انرژی برای فینهای nام و معادلات انرژی و پیوستگی برای ناحیهی متخلخل بین آن دو فین حل میشود. ترتیب حل معادلات ناحیهی متخلخل به این صورت است که ابتدا با استفاده از معادلهی (۲۳) مقدار فشار در هر حجم کنترل بهدست میآید و سپس با استفاده از رابطهی دارسی توزیع سرعت در بستر محاسبه میشود. حال با داشتن مقادیر سرعت، مقدار دما از معادلهی انرژی بهدست میآید.

پس از اینکه معادلات مربوط به تمامی فینها و نواحی متخلخل بین آنها حل شد اگر معیار همگرایی ارضا شده باشد گام زمانی بعد آغاز میشود و در غیر اینصورت تکرار از معادلهی انرژی سیال ناقل حرارت آغاز میشود. پس از همگرا شدن هر گام زمانی مرحلهی سیکل در گام بعد معین میشود و حل معادلات ادامه مییابد. بهدلیل اینکه معادلهی پیوستگی نسبت به سایر معادلات دیرتر همگرا میشود، در مراحل اول و سوم بهازای هر بار تکرار معادلات سیال ناقل حرارت، لولهی فلزی، فینها و معادلهی انرژی بستر، معادلهی پیوستگی سه بار تکرار میشود تا سرعت همگرایی افزایش یابد.

یکی از مواردی که باید در مورد مطالعات عددی بررسی شود استقلال نتایج از شبکه و مقدار گام زمانی است. پس از بررسی تعداد شبکه و گامهای زمانی مختلف مشاهده شد با افزایش تعداد شبکه و کوچک کردن گام زمانی نتایج به سمت یک مقدار مشخص میل میکند که نشاندهندهی استقلال نتایج از شبکه و گام زمانی میباشد. افزایش بیش از حد تعداد شبکه، افزایش زمان محاسبات را بهدنبال خواهد داشت؛ به همین دلیل یک مقدار مناسب برای ادامهی محاسبات انتخاب شده است. با استفاده از ۱۶حجم کنترل در جهت x، ۱۶ شبکه در جهت y، ۸ شبکه بین هر فین و ۳ شبکه برای امتداد شعاعی لولهی فلزی، کمتر از ۲٪ خطا در نتایج نسبت به شبکهی ریزتر وارد خواهد شد و در نتیجه همین ابعاد شبکه برای ادامهی بررسی نتایج انتخاب شده است. به دلیل تغییرات شدید در مراحل اول و سوم که در جرم ثابت اتفاق میافتند و تغییرات کمتر در مراحل دوم و چهارم که در فشار ثابت اتفاق میافتند از دو گام زمانی مختلف برای این مراحل استفاده شده است. به منظور انتخاب گام زمانی مناسب، نتایج با گامهای زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد با استفاده از گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه برای مراحل جرم ثابت و گام زمانی ۰/۶ ثانیه برای مراحل فشار ثابت،کمتر از ۱٪ خطا نسبت به گام زمانی کوچکتر در محاسبات وارد خواهد شد.

برای بررسی صحت برنامهی کامپیوتری نوشته شده و نیز روش مدلسازی بهکار رفته نیاز است نتایج عددی با یک نمونهی تجربی مقایسه شود. مرجع [17] در یک مطالعهی آزمایشگاهی از جفت جاذب و جذب شوندهی سیلیکاژل نوع SWS-1L و آب استفاده کرده است. مبدل حرارتی که بهعنوان بستر مادهی جاذب استفاده شده است لولههایی با فینهای حلقوی از جنس فولاد ضدزنگ میباشد که فضای بین فینها با ذرات سیلیکاژل پر شده است. برای بررسی صحت نتایج بهدست آمده، شبکهبندی یکچهارم استوانه توسط برنامهی کامپیوتری در مختصات عمومی تولید شده و نتایج با مقادیر بهدست آمده از نمونهی تجربی [17] مقایسه شدهاند. پارامتر توان بستر برای مقایسه انتخاب شده است زیرا این پارامتر تحت تأثیر توزیع دما و فشار بستر میباشد و هر گونه خطا در محاسبات دما و فشار در این پارامتر منعکس خواهد شد. در شکل (٤) مقدار توان بستر مادهی جاذب در نمونهی آزمایشگاهی و نتایج مدلسازی نشان داده شده است و

مشاهده می‌شود نتایج به میزان قابل قبولی بر هم منطبق می‌باشند. اطلاعات بیش‌تر در رابطه با نمونه‌ی تجربی در مرجع [17] بیان شده است.



شکل ٤ مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از روش عددی و تجربی توان بستر ماده‌ی جاذب بر حسب زمان

نتایج و بحث

در این بخش، پدیده‌های انتقال جرم و حرارت بستر در هر یک از چهار فرآیند سیکل به‌صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه تأثیر ارتفاع فین بر عملکرد چیلر جذب سطحی توضیح داده شده است. مقادیر انتخاب شده برای بررسی عملکرد چیلر در جدول (۱) آورده شده است. این مقادیر بر اساس شرایط عملی انتخاب شده است. به‌عنوان مثال دمای آب گرم ورودی ۸۰ درجه سانتی‌گراد در ساختمان‌ها استفاده می‌شود و دمای ۱۰ درجه سانتیگراد برای سیال سرد شده برای تهویه‌ی ساختمان‌ها مناسب است. برای ابعاد هندسی از مقادیر استاندارد استفاده شده است؛ به‌عنوان مثال برای قطر لوله، استاندارد لوله‌ی مسی استفاده شده است. جنس لوله‌ی فلزی و فین‌ها، مس در نظر گرفته شده است.

در بررسی عملکرد چیلرهای جذب سطحی دو پارامتر ضریب عملکرد (COP) و ظرفیت سرمایش مخصوص (SCP) دارای اهمیت زیادی هستند و در این مطالعه برای طراحی بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. روابط استفاده شده برای محاسبه‌ی این دو پارامتر به شکل زیر است.

$$\mathrm{COP} = \frac{Q_{\mathrm{evaporator}}}{Q_{\mathrm{heating}}} \tag{۳۸}$$

$$\mathrm{SCP} = \frac{Q_{\mathrm{evaporator}}}{m_{\mathrm{silica\ gel}} * t_{\mathrm{cycle}}} \tag{۳۹}$$

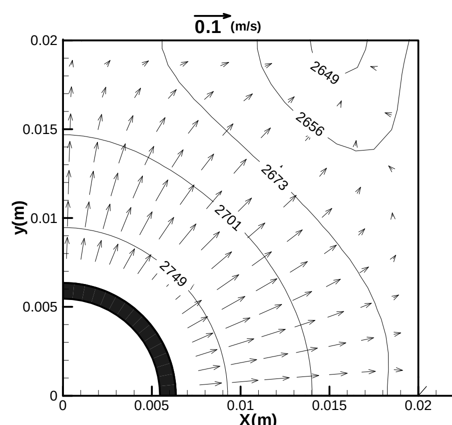
جدول ۱ مقادیر پارامترها و شرایط اعمال شده در مدل‌سازی

سرعت سیال ناقل حرارت	u_f	m/s	۱/۱
دمای آب گرم ورودی	$T_{heating}$	K	۳۵۸/۱۵
دمای آب سرد ورودی	$T_{cooling}$	K	۲۹۸/۱۵
دمای اواپراتور	T_{evap}	K	۲۸۳/۱۵
دمای کندانسور	T_{cond}	K	۲۹۸/۱۵
چگالی میانگین بستر	ρ_s	kg/m^3	٦٥۰
ظرفیت گرمایی ویژه‌ی بستر	C_{ps}	j/kg. K	۹۲٤
ضریب انتقال حرارت هدایت بستر	λ_s	$\frac{W}{m.K}$	۰/۲
گرمای جذب	ΔH	kj/kg	۲٦۹۰
قطر داخلی لوله‌ی فلزی	Di	mm	۱۰/۹۲
قطر خارجی لوله‌ی فلزی	Do	mm	۱۲/۷
ضخامت فین	FT	mm	۰/۲
فاصله بین فین‌ها	FS	mm	۵
قطر ذرات جاذب	d_p	mm	۰/۳
تخلخل بستر جاذب	ε_b		۰/۳٦
تخلخل ذرات	ε_p		۰/٤٦

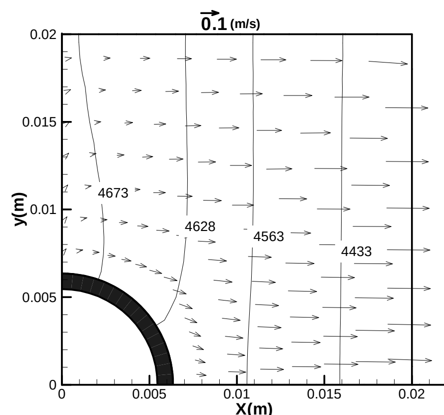
ضریب عملکرد در واقع میزان سرمایش تولید شده به هزینه‌ی انجام شده را نشان می‌دهد در حالی‌که ظرفیت سرمایش مخصوص نشان‌دهنده‌ی میزان سرمایش بر واحد جرم ماده‌ی جاذب بستر بر واحد زمان است. یکی از پارامترهایی که تأثیر زیادی در عملکرد سیکل دارد مقدار ارتفاع فین است. برای بررسی اثر ارتفاع فین بر این دو پارامتر باید مقادیر دما، فشار، سرعت‌ها و مقدار بخار جذب شده در هر لحظه

در تمامی نقاط بستر و در مراحل مختلف سیکل محاسبه شود. به‌علاوه برای درک به‌تر رفتار جریان در بستر ماده‌ی جاذب تغییرات حوزه‌های فشار و سرعت و عملکرد بستر ماده‌ی جاذب در فرآیندهای چهارگانه‌ی سیکل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در زمان t=۱۰ sec که در شکل (۵) نشان داده شده است بستر در مرحله‌ی جرم ثابت در حال گرم شدن قرار دارد و شیرهای ارتباطی بین کندانسور و اواپراتور بسته است. بستر ماده‌ی جاذب از مرحله‌ی قبل مقدار زیادی بخار را در خود جذب کرده است تا در مراحل گرمایش جرم ثابت و گرمایش فشار ثابت بخار جذب شده در بستر احیا گردد. قسمت‌های نزدیک‌تر به لوله‌ی فلزی و فین‌ها زودتر گرم می‌شوند و سیال عامل موجود در ذرات جاذب در این نواحی سریع‌تر احیا می‌شود و باعث افزایش فشار نسبی در این ناحیه می‌گردد و در اثر این اختلاف فشار جریان شکل می‌گیرد. خروج سیال عامل از بستر ماده‌ی جاذب باعث افزایش فشار محفظه می‌شود. به‌علاوه فشار محفظه در تمام نقاط ثابت فرض شده است. بر خلاف نواحی نزدیک به لوله‌ی فلزی و فین‌ها که در اثر انتقال حرارت در حال احیا می‌باشند، ذرات جاذب گوشه‌ی بالا سمت راست شکل (۵) در حال جذب هستند و تولید یک ناحیه‌ی کم‌فشار در این منطقه می‌نمایند. سیال عامل هم از ناحیه‌ی احیا شده‌ی اطراف لوله و فین‌ها و هم از محفظه، جذب ذرات جاذب در این ناحیه می‌شود. دلیل این امر آن است که اولاً این ناحیه در مرحله‌ی قبل به‌دلیل انتقال حرارت کم‌تر نسبت به دیگر قسمت‌های بستر، سیال عامل کم‌تری جذب کرده است و در حال حاضر ظرفیت جذب مقدار بیش‌تر سیال عامل را دارد و ثانیاً از آن‌جا که این ناحیه به‌علت دارا بودن بیش‌ترین فاصله از سطوح حرارتی تحت تأثیر حرارت از سطح لوله و فین‌ها قرار نگرفته است فرآیند احیا در این ناحیه شروع نشده است و در واقع فرآیند جذب سیال در این ناحیه ادامه دارد. در اثر احیای بخار و بسته بودن شیرهای ارتباطی، فشار محفظه افزایش می‌یابد تا به فشار کندانسور برسد. در این هنگام شیر کندانسور باز می‌شود و فرآیند احیای بخار در فرآیند فشار ثابت ادامه می‌یابد.



شکل ۵ کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در بستر جاذب در صفحه‌ی xy و z=۰/۵ FS در زمان t=۱۰ sec

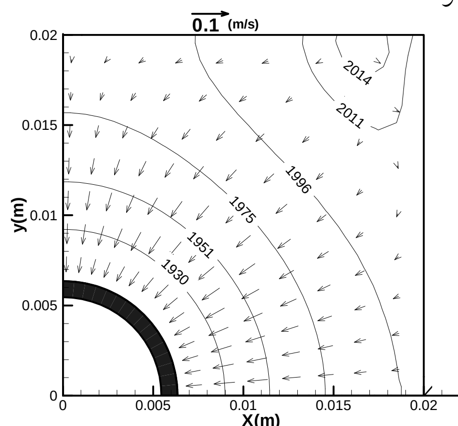


شکل ٦ کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در بستر جاذب در صفحه‌ی xy و z=۰/۵ FS در زمان t=۲۷ sec

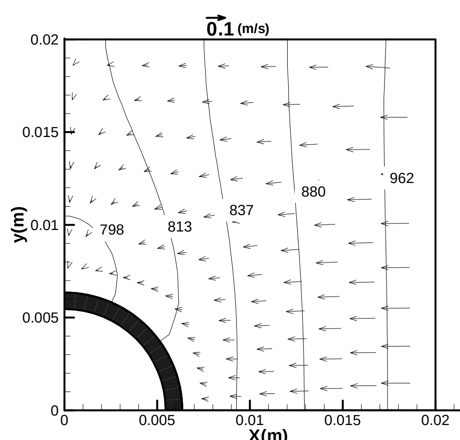
در زمان t=۲۷ sec که در شکل (٦) نشان داده شده است بستر در مرحله‌ی فشار ثابت در حال گرم شدن قرار دارد و شیر بین محفظه و کندانسور باز است. در اثر ادامه‌ی گرمایش، سیال عامل احیا شده و وارد محفظه می‌شود و هیچ جریانی از محفظه به داخل بستر وجود ندارد. سیال عامل احیا شده در بستر تنها از مرز

سمت راست می‌تواند وارد محفظه شود و باعث می‌شود یک جریان موازی به‌جز در نواحی نزدیک فین‌ها و لوله‌ی فلزی به سمت محفظه شکل گیرد. خطوط فشار ثابت عمود بر بردارهای سرعت می‌باشند و به‌دلیل فشار ثابت در محفظه تقریباً موازی مرز سمت راست می‌باشند.

شکل (۷) بستر را در زمان t=۲۳٤ sec که در مرحله‌ی جرم ثابت در حال سرد شدن قرار دارد نشان می‌دهد. مشابه مرحله‌ی ۱ شیرهای ارتباطی بین کندانسور و اواپراتور بسته است. در داخل لوله‌ی فلزی آب خنک‌کننده جریان دارد و قسمت‌های نزدیک‌تر به لوله‌ی فلزی و فین‌ها شروع به سرد شدن می‌کنند و در نتیجه سیال عامل در این نواحی در ذرات جاذب جذب می‌شود و باعث کاهش نسبی فشار در این قسمت‌ها می‌گردد. فشار محفظه به علت شروع فرآیند جذب شروع به کاهش کرده و در تمام نقاط محفظه ثابت فرض شده است. مشابه مرحله اول ناحیه گوشه‌ی بالا سمت راست در شکل (۷) بر خلاف دیگر نواحی بستر در حال احیا است و در اثر این عمل یک ناحیه‌ی پرفشار به وجود می‌آید که باعث می‌شود بخشی از بخار احیا شده به سمت محفظه جریان یابد و بخشی در نواحی کم فشار اطراف لوله و فین‌ها جذب شود. دلیل این امر این است که انتقال حرارت در نواحی دور از لوله‌ی فلزی و فین‌ها دیرتر اتفاق می‌افتد و این نواحی در مرحله‌ی قبل نسبت به سایر قسمت‌ها کم‌تر احیا شده‌اند. از طرفی این نواحی با تأخیر تحت تأثیر تغییر حالت از گرمایش به سرمایش قرار می‌گیرند و هنگامی که نواحی نزدیک به فین‌ها و لوله‌ی فلزی در حال خنک شدن و جذب هستند ناحیه‌ی دور از سطوح هم‌چنان در حال احیا می‌باشند. هرچه تعداد فین‌ها بیش‌تر باشد انتقال حرارت به ذرات جاذب سریع‌تر اتفاق افتد و زمان کم‌تری طول می‌کشد تا ذرات جاذب تغییر وضعیت از گرمایش به سرمایش و بالعکس را احساس کنند و در واقع گرمایش و سرمایش یکنواخت‌تری انجام خواهد شد. البته باید در نظر داشت که گرم و سرد کردن خود سطوح فلزی مستلزم هزینه است که باعث کاهش عملکرد سیستم می‌شود.



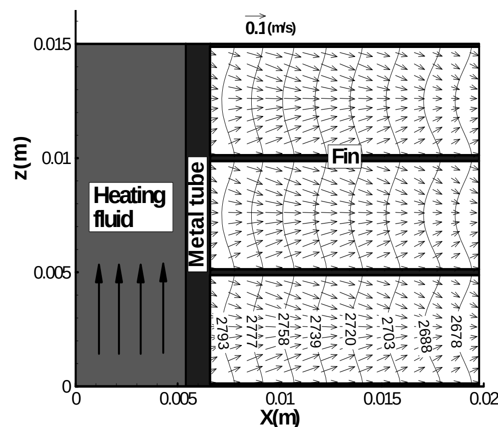
شکل ۷ کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در بستر جاذب در صفحه‌ی xy و z=۰/۵ FS در زمان t=۲۳٤ sec



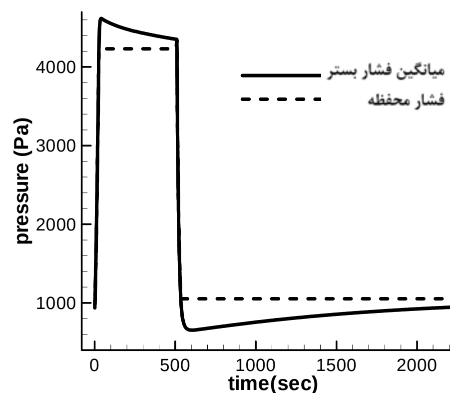
شکل ۸ کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در بستر جاذب در صفحه‌ی xy و z=۰/۵ FS در زمان t=۲٤٤ sec

شکل (۸) بستر را در زمان t=۲٤٤ sec که در مرحله‌ی سرد شدن در فشار ثابت قرار دارد نشان می‌دهد. شیر بین محفظه و اواپراتور باز است و در اثر ادامه‌ی سرمایش، سیال عامل از محفظه‌ی جذب ذرات

جاذب می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود کانتورهای فشار ثابت بر بردارهای جریان عمود هستند. در سایر زمان‌های این فرآیند نیز همین الگوی جریان در بستر حاکم می‌باشد.



شکل ۹ کانتورهای فشار و بردارهای سرعت در بستر جاذب در صفحه‌ی xz و y=۰ در زمان t=۱۰ sec



شکل ۱۰ تغییرات فشار میانگین بستر و فشار محفظه بر حسب زمان

سطوح انتقال حرارت شامل فین‌ها و سطح لوله‌ی فلزی به‌شدت بر فرآیند انتقال حرارت و جرم تأثیر دارند. برای مشاهده‌ی اثر فین‌ها، بردارهای سرعت و کانتورهای فشار در صفحه‌ی عمود بر فین‌ها در مرحله‌ی اول یعنی در فرآیند گرمایش جرم ثابت که در آن بستر جاذب احیا می‌شود در زمان t=۱۰ sec شکل (۹) نشان داده شده است. نواحی نزدیک‌تر به فین‌ها زودتر تحت تأثیر انتقال حرارت قرار می‌گیرند و باعث می‌شود سیال عامل موجود در ذرات جاذب نزدیک به فین‌ها زودتر احیا شوند. سیال عامل احیا شده از ذرات در نزدیک فین‌ها وارد قسمت‌های میانی بین دو فین شده و از بستر خارج می‌شود. طراحی ابعاد هندسی فین‌ها تأثیر زیادی در انتقال حرارت و در نتیجه انتقال جرم در بستر جاذب دارد و طراحی بهینه‌ی فین‌ها در عملکرد چیلر از اهمیت زیادی برخوردار است.

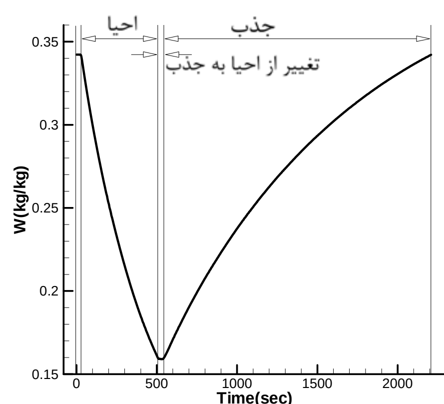
بررسی تغییرات زمانی فشار متوسط بستر و فشار محفظه به درک مراحل مختلف سیکل نیز کمک می‌نماید. در شکل (۱۰) تغییرات فشار میانگین در بستر ماده‌ی جاذب و فشار محفظه بر حسب زمان نشان داده شده است. در مرحله‌ی جرم ثابت که شیرهای ارتباطی با کندانسور و اواپراتور بسته‌اند، افزایش دما باعث احیا سیال عامل می‌شود و فشار در بستر و محفظه افزایش می‌یابد. افزایش فشار در این مرحله در زمان کوتاهی انجام می‌شود و هنگامی که فشار داخل محفظه به فشار کندانسور برسد، شیر ارتباطی با کندانسور باز می‌شود و احیای سیال عامل در فشار ثابت محفظه ادامه می‌یابد. به‌دلیل مقاومت انتقال جرم بین ذرات جاذب، هنگامی که فشار محفظه به فشار کندانسور رسیده است، فشار در نقاط داخلی بیش‌تر از فشار محفظه می‌باشد که باعث می‌شود فشار میانگین بستر از فشار محفظه بیش‌تر باشد. هنگامی که فشار محفظه در فشار کندانسور ثابت می‌ماند، با کاهش نرخ احیا سیال عامل به‌تدریج فشار میانگین بستر کاهش می‌یابد و به فشار کندانسور میل می‌کند. هرچه ارتفاع فین‌ها بیش‌تر باشد، اختلاف بین فشار میانگین بستر و فشار محفظه به‌دلیل وجود مسیر سخت‌تر برای خروج سیال عامل احیا شده از بین ذرات جاذب بیش‌تر خواهد بود. پس از این‌که احیای سیال عامل توسط ذرات جاذب به پایان رسید، شیرهای ارتباطی با کندانسور و اواپراتور بسته می‌شود و فرآیند جذب

در جـرم ثابـت بـا سـرد کـردن ذرات جـاذب شـروع می‌گردد. این عمل باعث می‌شود فشار محفظه تا فشـار اواپراتور سریعاً کاهش یابد. بخش عمـده‌ی جـذب در فشار ثابـت محفظـه اتفـاق مـی‌افتـد. مجـدداً مشـاهده می‌شود که فشار میانگین بستر تا حدی کم‌تـر از فشـار محفظه است. همین اختلاف فشار باعـث رانـدن بخـار موجود در محفظه به لایه‌های میانی بستر می‌شود تا در آن‌جا جذب شود. بـدیهی اسـت هرچـه بـه انـتهـای فرآیند جذب در فشار ثابت محفظـه نزدیـک‌تـر شـویم اختلاف فشار میانگین بستر و محفظه کم‌تر می‌شود.

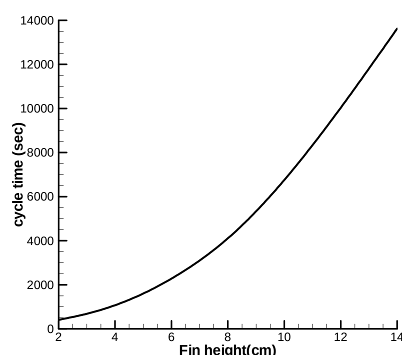
یکی از پارامترهایی که تأثیر زیادی در توزیع دما و فشار و عملکرد سیکل دارد مقدار جذب سیال عامل در ذرات جاذب است.

بـه‌منظـور بررسـی مقـدار جـذب در زمـان‌هـای مختلف، تغییرات مقدار میانگین سیال جـذب شـده در فاز جامد نسبت به زمان در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در مرحله‌ی اول مقدار سیال عامل جـذب شـده تقریباً ثابت مـی‌مانـد و در مرحلـه‌ی دوم سـیال عامـل موجود در ذرات جـاذب احیـا شـده و وارد کندانسـور می‌شود و مقدار جذب کـاهش مـی‌یابـد. در مرحلـه‌ی سوم مانند مرحله‌ی اول مقدار سیال عامل جذب شـده تقریباً ثابت خواهد ماند و در مرحله‌ی چهارم، با سـرد شدن ذرات جاذب، سیال عامـل از اواپراتـور در ذرات جاذب جذب شده و مقـدار جـذب افـزایش مـی‌یابـد. محفظه‌ی جاذب در مرحلـه‌ی دوم بـه کندانسـور و در مرحله‌ی چهارم به اواپراتور متصـل اسـت و بـه دلیـل پـایین‌تـر بـودن فشـار در اواپراتـور، عمـل جـذب در مرحله‌ی چهارم با سرعت کم‌تری نسبت به عمل احیـا در مرحله‌ی دوم اتفاق می‌افتد.

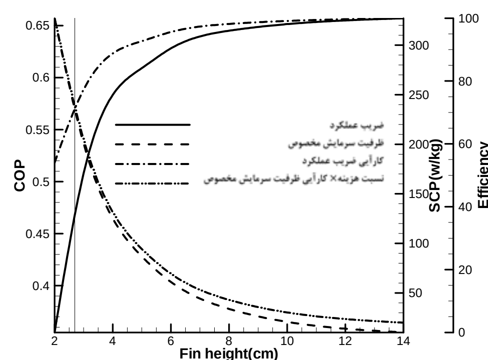
زمان لازم برای جذب و احیای سیال عامـل زمـان سیکل را تعیین می‌کند که تحـت تـأثیر مـاده‌ی جـاذب موجود در بستر و در نتیجه ارتفاع بسـتر مـی‌باشـد کـه همان ارتفاع فین‌ها است. افزایش زمان سیکل هم‌چنـان که قبلاً اشاره شد بر میزان سـرمایش مخصـوص تـأثیر مستقیم دارد و آن را کـاهش مـی‌دهـد. در شـکل (۱۲) تغییرات زمان سیکل بر حسب ارتفـاع فـین نشـان داده شده است. افزایش ارتفاع فین باعث می‌شود تـا انتقـال حرارت بـه ذرات جـاذب کـه فاصـله‌ی بـیش‌تـری از سطوح حرارتی دارنـد دیرتـر اتفـاق افتـد و زمـان هـر سیکل افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع فین علاوه بر این باعث می‌شود تا سیال عامل احیا شده از ذرات نزدیـک لوله در مرحله‌ی اول و دوم مسیر بـیش‌تـری را از بـین ذرات جاذب طی کند تـا از بسـتر خـارج شـود و وارد محفظه شود و در مرحله‌ی سوم و چهارم سیال عـاملی که می‌خواهد جذب ذرات جاذب در نزدیک لوله شـود باید مسیر بیش‌تری را از بین ذرات جاذب طی کنـد تـا جذب ذرات جاذب در این نواحی شود که این امر نیـز باعث بیش‌تر شدن زمان سیکل خواهد شد.



شکل ۱۱ مقدار جذب میانگین بر حسب زمان



شکل ۱۲ تغییرات زمان سیکل برحسب ارتفاع فین



شکل ۱۳ مقادیر ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص بر حسب ارتفاع فین

علاوه بر زمان سیکل دو پارامتر جرم ذرات جاذب و ظرفیت سرمایش نیز بر ظرفیت سرمایش مخصوص که یکی از پارامترهای مهم در طراحی می‌باشد تأثیر می‌گذارند. واضح است که با افزایش ارتفاع فین، فضای بین فین‌ها و در نتیجه جرم ماده‌ی جاذب افزایش می‌یابد. با افزایش جرم ماده‌ی جاذب مقدار سیال عامل جذب و احیا شده در هر سیکل افزایش می‌یابد. ظرفیت سرمایش چیلر به‌دلیل افزایش مقدار سیال عامل در گردش سیکل افزایش خواهد یافت. افزایش زمان سیکل و جرم ذرات جاذب در جهت کاهش SCP و افزایش ظرفیت سرمایش در جهت افزایش SCP است. با توجه به این‌که شدت افزایش زمان سیکل و جرم ذرات جاذب بیش‌تر از افزایش ظرفیت سرمایش است، افزایش ارتفاع فین‌ها باعث کاهش مقدار SCP خواهد شد. تغییرات ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص بر حسب ارتفاع فین در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

هرچه زمان سیکل بیش‌تر باشد، تعداد دفعات تغییر حالت از جذب به احیا و بالعکس کم‌تر اتفاق می‌افتد. گرمای مورد نیاز سیکل را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: بخش اول که صرف تأمین گرمای جذب می‌شود و در واقع گرمایی است که در فرآیند احیا باید به ذرات جاذب داده شود تا سیال عامل را احیا کند. بخش دیگر گرمایی است که در هر تغییر وضعیت صرف گرم کردن لوله‌ی فلزی، فین‌ها، ذرات جاذب و سیال ناقل حرارت داخل لوله می‌شود. این مواد در مرحله‌ی سوم و چهارم مجدداً سرد می‌شوند و در واقع این بخش از انرژی حرارتی بدون این که از آن مستقیماً در فرآیند احیا و در نتیجه ایجاد سرمایش استفاده‌های شود هدر خواهد رفت. نتایج نشان می‌دهد در نمونه‌ی مورد بررسی در a = ۲ cm مقدار ٥٦ درصد از انرژی حرارتی و در a = ١٤ cm مقدار ۲۷ درصد از انرژی حرارتی هدر خواهد رفت. بدین ترتیب با افزایش ارتفاع فین، نسبت انرژی حرارتی هدر رفته به انرژی حرارتی مفید کاهش می‌یابد و این امر باعث می‌شود مقدار COP با افزایش ارتفاع فین افزایش یابد.

افزایش ارتفاع فین، افزایش ضریب عملکرد و کاهش ظرفیت سرمایش مخصوص را به‌همراه دارد و نیاز است یک مقدار بهینه برای آن انتخاب شود. در انتخاب مقدار بهینه‌ی فین باید به چند عامل توجه داشت. از طرفی افزایش COP هزینه‌های انرژی مورد نیاز برای سرمایش را کاهش می‌دهد ولی از طرف دیگر افزایش SCP هزینه‌های اولیه‌ی تولید را کاهش خواهد داد. بنابراین در کاربردهایی که از انرژی در حال هدر رفتن یا انرژی رایگان مانند خورشید برای تأمین انرژی حرارتی استفاده می‌شود افزایش SCP مهم‌تر به نظر می‌رسد زیرا هزینه‌ی اندکی بابت انرژی حرارتی پرداخت می‌شود و کاهش هزینه‌ی اولیه از نظر اقتصادی به صرفه‌تر خواهد بود. اما در مکان‌هایی که از انرژی‌های مفید مانند سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی بهره گرفته می‌شود افزایش COP مهم‌تر می‌باشد. برای محاسبه‌ی مقدار بهینه، کارآیی ضریب عملکرد و کارآیی ظرفیت سرمایش مخصوص به‌ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{COP efficiency} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\max}} * 100 \qquad (٤٠)$$

$$\text{SCP efficiency} = \frac{\text{SCP}}{\text{SCP}_{max}} * 100 \quad (٤١)$$

سپس با توجه به هزینه‌ی مواد اولیه و هزینه‌ی انرژی، نسبت هزینه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Cost ratio} = \frac{\text{energy cost}}{\text{initial cost}} \quad (٤٢)$$

این نسبت در واقع نسبت هزینه‌های اولیه به هزینه‌ی انرژی حرارتی می‌باشد که باید معین شود. در نهایت محل تقاطع نمودارهای کارآیی ضریب عملکرد و کارآیی ظرفیت سرمایش مخصوص ضربدر نسبت هزینه، مقدار بهینه‌ی فین از نظر اقتصادی می‌باشد. در شکل (١٣) مقدار کارآیی در حالتی که COP و SCP از اهمیت یکسانی برخوردار باشند و نسبت هزینه مقدار یک باشد، نشان داده شده و مقدار $a = 2.7$ cm به‌عنوان مقدار بهینه از نظر ظرفیت سرمایش مخصوص و ضریب عملکرد انتخاب شده است. در این مقدار، هر دو پارامتر COP و SCP در ٧١٪ حداکثر مقدار خود قرار دارند.

نتیجه‌گیری

پارامترهای زیادی بر عملکرد چیلرهای جذب سطحی تأثیر دارند. در این مقاله تأثیر ارتفاع فین بر دو پارامتر اصلی COP و SCP که طراحی چیلر را ارزیابی می‌کنند بررسی شد. در این بررسی مشاهده شد افزایش ارتفاع فین باعث افزایش COP و کاهش SCP می‌شود و یک روش کاربردی برای محاسبه‌ی مقدار بهینه‌ی ارتفاع فین از نظر اقتصادی ارائه گردید که با استفاده از آن با توجه به هزینه‌ی انرژی و مواد اولیه بتوان ارتفاع فین مناسب را محاسبه کرد. در نمونه‌ی مورد بررسی در صورتی که هزینه‌ی انرژی و هزینه‌ی مواد اولیه یکسان باشند، مقدار ارتفاع فین ٢/٧ cm به‌عنوان مقدار بهینه محاسبه می‌شود. هم‌چنین برخی از پارامترهای اساسی مانند جذب و فشار در مراحل مختلف سیکل بررسی شد و مورد بحث قرار گرفت.

علائم و نشانه‌ها

A	مساحت (m^2)
COP	ضریب عملکرد
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)
	پخشندگی نودسن (m^2/s)
D_m	پخشندگی کانتینیوم (m^2/s)
d_p	قطر ذرات جاذب (m)
E_a	انرژی فعال‌سازی (J/kg)
FT	ضخامت فین (m)
FS	فاصله‌ی بین فین‌ها (m)
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی $(W.m^{-2}.K^{-1})$
K_{app}	نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب (m^2)
K_d	نفوذپذیری بستر
M	جرم مولکولی (kg/mol)
n	بردار عمود بر صفحه
P	فشار (Pa)
R	ثابت جهانی گازها (j/kmol.K)
SCP	ظرفیت سرمایش مخصوص (w/kg)
t	زمان (s)
T	دما (K)
u	سرعت (m/s)

علائم یونانی

ΔH	گرمای جذب (J/kg)
ε	تخلخل
λ	ضریب انتقال حرارت هدایت $(W.m.K^{-1})$
μ	ویسکوزیته (N/m.s)

زیرنویس‌ها

b	بستر ماده‌ی جاذب	f	سیال ناقل حرارت
		g	فاز بخار سیال عامل احیا شده

مراجع

1. Demir, H., Mobedi, M. and Ulku, S., "A Review on Adsorption Heat Pump: Problems and Solutions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 2381–2403, (2008).
2. Waszkiewicz, S.D., Tierney, M.J. and Saidani Scott, H., "Development of Coated, Annular Fins for Adsorption Chillers", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2222–2227, (2009).
3. Freni, A., Russo, F., Vasta, S., Tokarev, M., Aristov, Yu.I. and Restuccia, G., "An Advanced Solid Sorption Chiller Using SWS-1L", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 2200–2204, (2007).
4. Restuccia, G., Freni, A., Russo, F. and Vasta, S., "Experimental Investigation of a Solid Adsorption Chiller Based on a Heat Exchanger Coated with Hydrophobic Zeolite", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 1419–1428, (2005).
5. Li Yong. and Sumathy, K., "Comparison Between Heat Transfer and Heat Mass Transfer Models for Transportation Process in an Adsorbent Bed", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1587–1598, (2004).
6. Riffel, D.B., Wittstadt, U., Schmidt, F.P., Nunez, T., Belo, F.A., Leite, P.F. and Ziegler, F., "Transient Modeling of an Adsorber Using Finned-Tube Heat Exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1473–1482, (2010).
7. Chua, H.T., Ng, K.C., Wang, W., Yap, C. and Wang, X.L., "Transient Modeling of a Two-Bed Silica Gel–Water Adsorption Chiller", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 659–669, (2004).
8. Leong, K.C. and Liu, Y., "Numerical Modeling of Combined Heat and Mass Transfer In The Adsorbent Bed of a Zeolite/Water Cooling System", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 2359–2374, (2004).
9. Maggio, G., Freni, A. and Restuccia, G., "A Dynamic Model of Heat and Mass Transfer In a Double-Bed Adsorption Machine with Internal Heat Recovery", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, pp. 589–600, (2006).
10. Niazmand, H. and Dabzadeh, I., "Numerical simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp. 581–593, (2012).
11. Zhang, L.Z., "A Three-Dimensional Non Equilibrium Model for an Intermittent Adsorption Cooling System", *Solar Energy*, Vol. 69, pp. 27–35, (2000).

12. Chang, W.S., Wang, C.C. and Shieh, C.C., "Design and Performance of a Solar-Powered Heating and Cooling System Using Silica Gel/Water Adsorption Chiller", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2100–2105, (2009).
13. Yang, G.Z., Xia, Z.Z., Wang, R.Z., Keletigui, D., Wang, D.C., Dong, Z.H. and Yang, X., "Research on a Compact Adsorption Room Air Conditioner", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp. 2167–2177, (2006).
14. Ng, K.C., Chua, H.T., Chung, C.Y., Loke, C.H., Kashiwagi, T., Akisawa, A. and Saha, B.B., "Experimental Investigation of The Silica Gel-Water Adsorption Isotherm Characteristics", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 1631- 1642, (2001).
15. , D.D., "*Adsorption Analysis: Equilibria And Kinetics*", Imperial College Press, (1998).
16. Demir, H., Mobedi, M. and Ulku, S., "Effects of Porosity on Heat and Mass Transfer in a Granular Adsorbent Bed", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 372–377, (2009).
17. Restuccia, G., Freni, A., Vasta, S. and Aristov, Y., "Selective Water Sorbent for Solid Sorption Chiller: Experimental Results and Modelling", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, pp. 284–293, (2004).